

学位論文題名

A Study on Mold Design by CSG Solid Modeling

(CSG ソリッドモデリングによる金型設計に関する研究)

学位論文内容の要旨

射出成形により量産されるプラスチック製品及び部品の日常生活や工業部門への浸透は著しいものがあるが、技術レベルで見た場合、その設計・製造は旧態依然のところが多く、設計者や現場のノウハウや勘に頼っているところが多い。従来より、商品のタイムリーな市場への投入のための設計期間の短縮が切望されており、CAD/CAMがそこに果たして来た役割は広く認識されている。しかし、金型設計に関しては、CAD/CAMの活用は十分とはいえないのが現状である。これは、金型設計には通常の機械設計とは異なった特殊な設計作業が要求されるためである。金型設計・製造のCAD/CAM化への期待は、現在なお、具体的に解決すべき問題の多様さと困難さに比例して大きいものがある。

本論文は、上記の課題に関して研究を行った結果について論述したものであり、10章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、従来の問題点、本研究の目的について述べている。また、本論文の構成と概要について言及している。

第2章では、本研究で用いている形状モデリング法について論じており、任意の3次元形状に対する金型形状を理論的に導出している。本研究では、金型設計特有な諸問題の解決を計り個々に問題向きな解決法を提案しているが、金型設計用CAD/CAMシステムの構築を考えた時、形状定義及び形状処理の点ですべてを貫く共通の土台が不可欠である。本研究では、3次元形状を正確かつ完全に定義でき、形状処理を行えるCSGソリッドモデルをその共通の土台としている。CSGは、プリミティブと呼ばれる数種類の3次元基本形状の集合演算により任意の3次元形状を定義する。それぞれのプリミティブは、3次元ユークリッド空間上の点集合としての閉じた部分空間で、複数の半空間の積集合により定義される。また、同空間上の任意の一点が、定義された形状の内か、外か、表面上かを判定する境界評価関数を導入し、形状処理法の基本数式としてこれを用いるベナルティ法に言及している。

第3章は、金型からの成型品の抜き方向（成型時の金型の開閉する方向と同一とする）の自動決定問題について述べている。成型時にプラスチックを充填するための空洞を有する金型のキャビティ及びコアは、基本的には製品形状を空間的に反転した形状（数学的には3次元補集合に相当する）である。ただし、単純な空間反転では、ブランク形状の中に製品形状の形をした孤立した空洞のみが生じ、これを射出成形用金型として利用するためには、キャビティとコアに分離しなければならない。この分離は、製品の抜き方向及びパーティング面の決定により実現できる。パーティング面は、抜き方向に製品形状を投影した最外形から求められるので抜き方向の決定が問題となる。抜き方向は、離型の際の金型と成型品の干渉（アンダーカット）を回避するよう決定しなければならない。アンダーカットを回避不可能な製品形状の場合には、サイドコアを用いる等のいわゆるアンダーカット処理が必要となるが、アンダーカット処理は、金型の構造を複雑にし、金型のコスト、信頼性に悪影響を及ぼす。また、成形サイクルにも悪影響を及ぼし、結果

的に成形品のコストアップにつながる。本研究では、‘アンダーカット量’という尺度を導入しアンダーカットの定量化を行い、アンダーカットのない抜き方向を探索により求めることを提案している。探索法としては遺伝的アルゴリズムを用いており、アンダーカットのない抜き方向が存在すれば、それを求めることができることを数値実験を通して示している。

第4章では、金型設計特有な問題の内、収縮問題と抜き勾配問題について述べている。プラスチックは成形直後の高温状態から室温まで冷める間に収縮を起こす。この収縮は、成形時のプラスチックの射出圧や温度等の成形条件により異なり、成形品のねじれや歪みを生じる原因となる。本研究では、個々のプラスチック固有の標準的な収縮率を用いて、成形品全体が一様に収縮するとした場合のキャビティ及びコア形状を求め、キャビティ及びコア形状を構成する個々のプリミティブの形状パラメータの修正により収縮問題のアプローチを行っている。

成形後、成形品を型から取り出す際、成形品が抜き方向に深い場合、抜き勾配が必要となる。すなわち、抜き勾配を製品形状につける問題を抜き勾配問題として定式化し、勾配をつける面と、勾配の基準及び角度を指定することにより、製品形状を構成する個々のプリミティブの変換（例えば、円柱→円錐）により実現できることを明らかにしている。

第5章では、収縮処理及び抜き勾配処理の完了した製品形状に対し、先に求めた抜き方向とパーティング面を用い、キャビティ及びコアを自動創成する問題について述べている。本論文では、製品形状とパーティング面を抜き方向に直線的にスイープした形状をブランク形状から引き算（数学的には差集合演算）することにより、キャビティ及びコア形状を自動創成する手法を展開している。

第6章では、製品公差から加工のための金型公差への変換問題について述べている。製品形状は、製品の機能を考えて寸法と公差の基準、及び寸法と公差そのものが決定されている。キャビティ及びコアを加工する場合、加工の基準を決めなければならないが、この加工の基準は一般に製品の基準と異なる。基準が異なると公差の変換が必要となる。加工公差は、加工後のキャビティ及びコアによる成形の結果できる製品が公差以内となるように決めなければならないが、基準が異なることにより、公差変換の結果、現実的でない厳しい公差となる場合がしばしば生ずる。これに対処するため、本研究では、金型設計者からの聞き取り調査により得られたノウハウを定式化した現実的な公差変換アルゴリズムを提案しており、本方法で妥当な加工公差の決定がなされることを示している。

第7章は、キャビティ及びコア部を成形機に取り付ける機能を持ち、成形時の型開閉の際の金型各部の動きとタイミングを決定する型構造の設計における連動修正問題について論じている。型構造設計では標準部品の利用が進んでいる。しかし実際には標準部品の一部修正・変更が必要となる場合も多い。本研究ではここに焦点を当て、型構造の一部を修正した時に、関連する部品をすべて連動修正するためのいわゆるパラメトリックデザイン法を提案している。本論文では、形状モデリング要素としてのモデロンの考え方を導入し、境界因子法により、連動修正が実現できることを示している。本方法は理論上、3次元形状にも適用可能であるが、本研究では、標準型構造が2次元図面で与えられることを想定し、2次元の連動修正を行い、連動修正後の2次元形状から3次元形状を自動創成する方法を採用している。

第8章では、実際にキャビティ及びコアを加工するためのNCデータの自動創成問題について述べている。本論文で提案している方法では、ペナルティ法を用いて、工具系と目的形状またはクランプ類との干渉をチェックし、削り過ぎや、削り残しのない工具移動経路を自動で求めている。なお、本論文では、荒削りと仕上げ削りの双方につき、工具経路の自動創成方法を提案し、実機加工の実験を通して正しい工具経路が得られることが確認されている。

第9章では、本論文で提案した金型設計特有な処理の解決法を組み入れた金型CAD/CAMプロトタイプ・システムの開発について述べている。まず、金型CAD/CAMシステムの要求分析結果と、それに基づいた概念設計の結果を述べ、さらに、実際に開発したプロトタイプ・システムの詳細を述べている。実際のシステムでは、対話型設計機能が要求されるが、要求分析の結果から、本プロトタイプ・システムでは、対話に用いるグラフィック出力は面画を採用する新しい対話方式を提案している。

第10章は、本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	嘉数	侑昇
副査	教授	大内	東
副査	教授	岸浪	建史
副査	教授	野口	徹

学位論文題名

A Study on Mold Design by CSG Solid Modeling

(CSG ソリッドモデリングによる金型設計に関する研究)

近年、射出成形により量産されるプラスチック製品及び部品の日常生活や工業部門への浸透は著しいものがある。しかし、その根幹的技術である金型設計に関しては、理論的解明が十分になされていない可塑性材料の成形現象を対象とするがゆえに、そこは依然として設計者の経験則を中心とした世界であり、その自動化レベルはいまだ初期状態にある。

一方、製品サイクルの短縮化現象や、それにとまなう製品製造コストの低減への要求から、これらの要求を満たすとされる金型設計のCAD/CAM化への期待は大きいものがあり、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況にある金型設計のCAD/CAM化について、CSGソリッドモデリングをベースにした金型設計の自動化を目的として、金型設計の各種部分問題へのアプローチを行った研究結果をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景、従来の問題点、本研究の目的について述べている。

第2章では、本研究で用いている形状モデリング法について論じており、任意の3次元形状に対する金型形状をCSGソリッドモデリング法により理論的に導出している。

第3章は、金型からの成型品の抜き方向の自動決定問題について述べている。本研究では、アンダーカット量という尺度を新たに導入し、離型の際の金型と成型品の干渉の定量化を行い、干渉のない抜き方向を探索により求めることを提案している。探索法としては遺伝的アルゴリズムを用いており、アンダーカットのない抜き方向が存在すれば、それを求めることができることを数値実験を通して示している。

第4章では、収縮問題と抜き勾配問題について述べている。本研究では、成型品全体が一樣に収縮するとした場合の金型形状を、個々のプリミティブの形状パラメータの修正により求めるという方法で、収縮問題へのアプローチを行っている。また、抜き勾配をつける問題を抜き勾配問題として定式化し、金型形状を構成する個々のプリミティブの変換により実現できることを明らかにしている。

第5章では、キャビティ及びコア形状を自動創成する問題について述べている。すなわち、製品形状とパーティング面を抜き方向に直線的にスイープした形状のブランク形状からの差集合演算により、キャビティ及びコア形状を自動創成する手法の提案である。

第6章では、製品公差から加工公差への変換問題について述べている。加工基準は一般に製品の基準と異なり、公差の変換が必要となるが、公差変換の結果、現実的でない厳しい公差となる場合がしばしば生ずる。これに対処するため、本研究では、金型設計者からの聞き取り調査により得られたノウハウを定式化した現実的な公差変換アルゴリズムを提案しており、本方法で妥当な加工公差の決定がなされることを示している。

第7章は、型構造設計における連動修正問題について論じている。本研究では、型構造の一部を修正した時に、関連する部品をすべて連動修正するためのいわゆるパラメトリックデザイン法を提案している。本論文では、形状モデリング要素としてのモデロンの考え方を導入し、境界因子法により、連動修正が実現できることを示している。

第8章では、実際にキャビティ及びコアを加工するためのNCデータの自動創成問題について述べている。本論文で提案している方法では、ペナルティ法を用いて、工具系と目的形状またはクランプ類との干渉をチェックし、削り過ぎや、削り残しのない工具移動経路を自動的に求めており、実機実験で正しい工具経路が得られることを確認している。

第9章では、本論文で提案した金型設計特有な処理の解決法を組み入れた金型CAD/CAMプロトタイプ・システムの要求分析結果と、それに基づいた概念設計の結果を述べ、実際に開発したプロトタイプ・システムの詳細を明らかにしている。これらは、金型設計用CAD/CAM実用システム構築の指針を与えるものと見なすことができる。

第10章では、本研究全体を総括している。

これを要するに、著者は、CSGソリッド・モデリングをベースにした金型設計自動化に必須となる各種部分問題解決法の開発、およびその実証を行い、多くの新知見を得たものであり、精密工学、金型設計工学に対して貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。